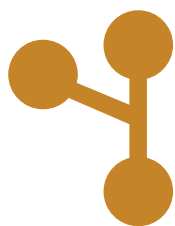


REVISTA TÉCNICO - CIENTÍFICA



robótica®

automação
controlo
instrumentação



ARTIGO CIENTÍFICO

- Robot controlado por som
- Cabine de polimento 4.0

VOZES DE MERCADO

- Os robots na indústria do calçado

INSTRUMENTAÇÃO

- Termopares industriais (1.ª Parte)

AUTOMAÇÃO E CONTROLO

- Lógica sequencial, registos e contadores (4.ª Parte)

ELETRÓNICA INDUSTRIAL

- Eletrónica (6.ª Parte)

PORTUGAL 3D

- Evolução de empresas na indústria aeronáutica
- Design generativo e Impressão 3D aplicados ao desenvolvimento de mobiliário

ESPECIAL SOBRE CONTROLO NUMÉRICO COMPUTORIZADO

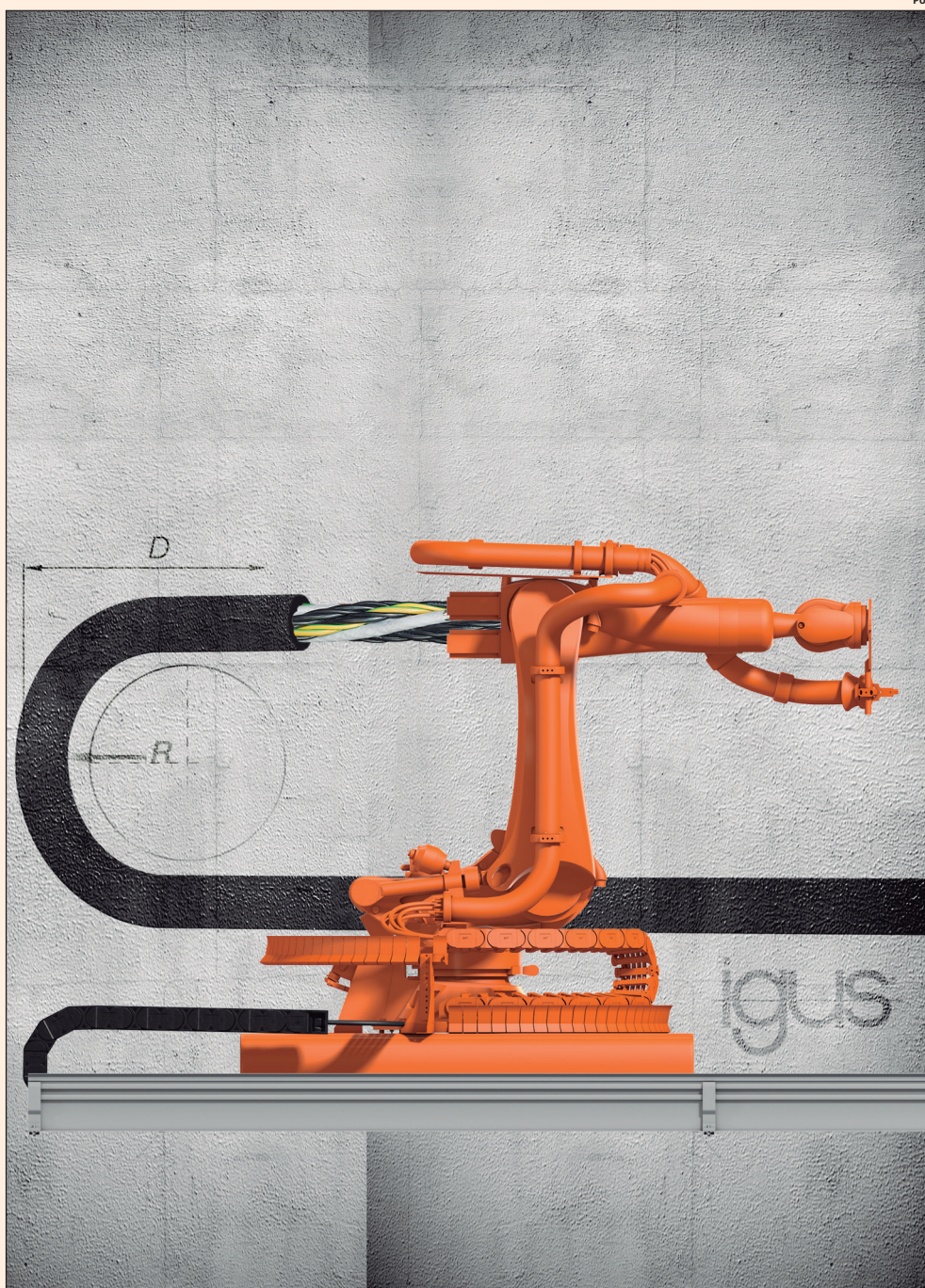
- A voz dos nossos clientes no mundo!
- O presente e os desafios do futuro do CNC
- Como manter a eficiência da tecnologia de controlo
- Encoders rotativos de elevada qualidade evitam erros dimensionais

REPORTAGEM

- Seminário Técnico mostra como EPLAN Electric P8 e PROJECT complete da Phoenix Contact se interligam
- Infaimon, Universal Robots e SCHUNK debatem Indústria 4.0 e automação colaborativa
- Pilz demonstra o seu *Spirit of Safety*
- WEG presente na FENGE 2019
- 9.º Encontro dos Distribuidores Weidmüller: "É preciso encontrar novas formas para fazer negócios"

ENTREVISTA

- Alexandre Monteiro, Schneider Electric: "experiência digital de excelência, focada nas especificidades e prioridades dos fabricantes de máquinas"



Termopares industriais

1.ª Parte

1. CONSTITUIÇÃO E PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Um **termopar** é um sensor de temperatura formado pela **junção de dois materiais** condutores ou semicondutores. O termopar utilizado na indústria, destinado a medir temperaturas elevadas, é constituído por uma junção de dois **metais** ou **ligas metálicas** diferentes.

A junção pode ser feita por diversos métodos salientando-se, como mais importantes, o aperto dos materiais ou a sua soldadura. A Figura 1a) apresenta um termopar industrial com a junção soldada e na Figura 1b) encontra-se a sua representação esquemática.

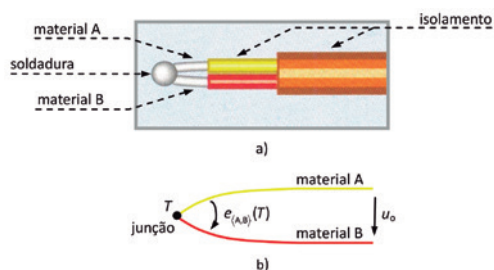


Figura 1. Termopar industrial com junção soldada (a) e representação esquemática (b).

O termopar é um **sensor activo**, isto é, ele próprio gera uma força electromotriz (f.e.m.) contínua, não sendo necessário alimentá-lo. O condicionador de sinal associado apenas deverá converter esta tensão num valor normalizado.

O funcionamento de um termopar baseia-se num conjunto de leis da electricidade a que se dá o nome de **efeitos termoelectrónicos**: o efeito de Seebeck¹, o efeito de Peltier² e o efeito de Thomson³.

1.1. Efeito de Seebeck

Numa junção de dois materiais A e B, à temperatura uniforme T , desenvolve-se uma **f.e.m. de Seebeck** (ou de contacto), cujo valor depende unicamente dos materiais e da sua temperatura

$$e_{(A,B)}(T) = f(\text{material A, material B}) \quad (1)$$

A explicação deste fenómeno tem por base o modelo das ligações de valência e das bandas de energia de um metal, transcendendo o âmbito desta exposição. Contudo, numa explicação sucinta, pode dizer-se que os níveis de energia dos electrões são

alterados de forma diferente, pela variação da temperatura, em cada metal, originando uma diferença de potencial na junção entre os dois metais distintos.

Uma vez que a dependência da f.e.m. de Seebeck com a temperatura T é quase linear, a equação (1) pode escrever-se na forma

$$e_{(A,B)}(T) = (\alpha_A - \alpha_B) T = \alpha_{AB} T \quad (2)$$

em que:

- $e_{(A,B)}$ – f.e.m. de Seebeck numa junção de materiais A e B, em V;
- α_A – coeficiente de Seebeck do material A, em $V K^{-1}$;
- α_B – coeficiente de Seebeck do material B, em $V K^{-1}$;
- T – temperatura da junção de materiais A e B, em K.

Representando α_{AB} a sensibilidade do termopar constituído pelos materiais A e B, à temperatura T .

1.2. Efeito de Peltier

O **efeito de Peltier**, descoberto em 1834, traduz o seguinte fenómeno: sempre que uma junção de dois materiais distintos é percorrida por uma corrente eléctrica I , desenvolve-se nesta uma quantidade de calor Q_p , por unidade de tempo, proporcional à referida corrente

$$\frac{dQ_p}{dt} = (\pi_A - \pi_B) I = \pi_{AB} I \quad (3)$$

em que:

- Q_p – quantidade de calor produzida/absorvida na junção, em J;
- π_A – coeficiente de Peltier do material A, em V;
- π_B – coeficiente de Peltier do material B, em V;
- I – intensidade da corrente eléctrica que atravessa a junção, em A.

Note-se que a quantidade de calor Q_p em jogo, devida ao efeito de Peltier, depende do sentido da corrente I , podendo haver **produção** ou **absorção** de calor, como indicado esquematicamente na Figura 2. Quando a corrente I circula do material A, menos electronegativo, para o material B, mais electronegativo, existe produção de calor ($\pi_{AB} > 0$) e quando a corrente I circula do material B para o material A, existe absorção de calor ($\pi_{BA} = -\pi_{AB} < 0$). Este fenómeno pode ser invertido com a alteração do sentido da corrente I . Chama-se a atenção para o facto de que este efeito aparece adicionado ao **efeito de Joule**, já conhecido da electricidade elementar, no qual, a passagem de uma corrente através de uma resistência, neste caso a junção, origina a produção de uma quantidade de calor proporcional ao quadrado dessa mesma corrente. No caso dos metais vulgares e para as intensidades de corrente eléctrica normalmente usadas, a quantidade de calor devida ao efeito de Peltier, Q_p , é muito menor do que a originada pelo efeito de Joule, Q_j . O mes-

¹ Thomas Johann Seebeck, físico russo de etnia germânica-báltica que descobriu este efeito termoelétrico em 1821, 1770–1831.

² Jean-Charles-Athanase Peltier, físico francês, 1785–1845.

³ William Thompson (Lord Kelvin), físico, matemático e engenheiro de origem escocesa-irlandesa, 1824–1907.

mo já não se passa com a junção de determinados materiais semicondutores, para os quais **poderá ser $Q_p \gg Q_j$** .

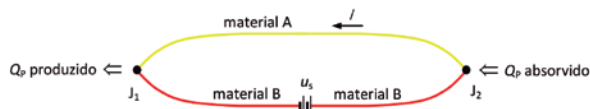


Figura 2. Permutação de calor por efeito de Peltier: produção de calor na junção J_1 e absorção de calor na junção J_2 .

A relação entre os coeficientes de Peltier, π , e de Seebeck, α , para uma junção à temperatura T , é dada por

$$\pi = \alpha T \quad (4)$$

O efeito de Peltier é utilizado em electrónica para o controlo de temperatura de componentes em circuitos. Na indústria de consumo é utilizado em pequenos frigoríficos sem compressor.

1.3. Efeito de Thomson

O **efeito de Thomson** (Lord Kelvin), observado em 1851, refere que sempre que um material condutor eléctrico homogéneo, sujeito a uma diferença de temperatura ΔT , é atravessado por uma corrente eléctrica I , é colocada em jogo uma quantidade de calor Q_T , por unidade de tempo, dada por

$$\frac{dQ_p}{dt} = \tau I \Delta T \quad (5)$$

em que:

- Q_T – quantidade de calor produzida/absorvida no condutor, em J;
- τ – coeficiente de Thomson, em $V K^{-1}$;
- I – corrente eléctrica que atravessa o condutor, em A;
- ΔT – diferença de temperaturas, em K.

A Figura 3 representa o troço do condutor eléctrico homogéneo, em que os pontos A e B se encontram às temperaturas T_1 e T_2 , respectivamente (com $T_1 < T_2$). Se a corrente I tiver o sentido do ponto A (mais frio) para o ponto B (mais quente) haverá uma variação temporal positiva da quantidade de calor, Q_T ,

$$Q_T = \tau I (T_2 - T_1) \quad (6)$$

correspondendo a uma produção de calor.

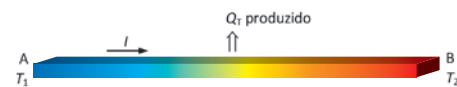
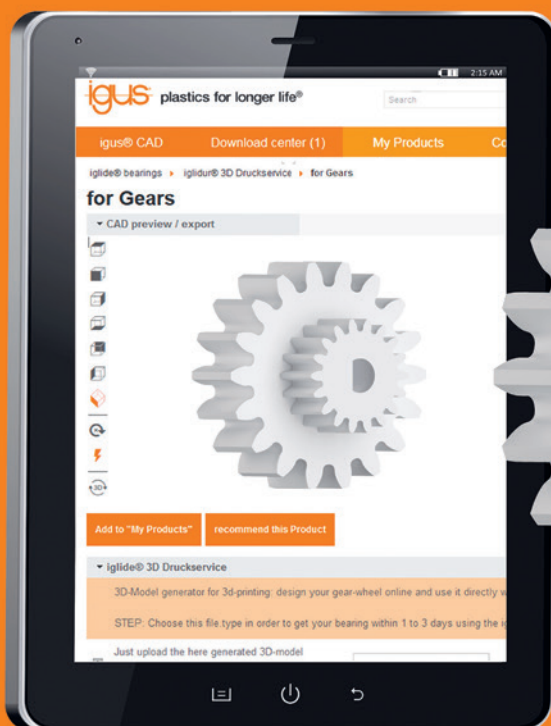


Figura 3. Produção de calor por efeito de Thomson, num condutor eléctrico homogéneo.

No caso de haver inversão do sentido da corrente I , relativamente ao gradiente de temperaturas ao longo do troço do condutor eléctrico homogéneo, isto é se a corrente I passar a circular da temperatura mais elevada T_2 , para a temperatura mais baixa T_1 , ter-se-á uma variação temporal negativa da quantidade de calor Q_T , porque será $\Delta T = (T_1 - T_2) < 0 K$, correspondendo a uma absorção de calor.

Configure online num minuto ... enviadas em 1 a 3 dias ...



... 40 % maior duração de vida*



Visite-nos: ITMA Barcelona – Pavilhão H2 Stand A217

Não é necessário gastar mais tempo e dinheiro a desenhar rodas dentadas: configure e encomende online rodas dentadas resistentes ao desgaste em apenas 60 segundos. Sem necessidade de moldes, sem quantidade mínima e muito económicas graças ao serviço de impressão 3D.

* em comparação com rodas dentadas em POM. Rodas de coroa testadas com binário de 5 Nm e 12 rpm no laboratório da igus* com 2750 m'.

igus.pt/engrenagens

igus* Lda. Tel. 22 610 90 00 info@igus.pt
plastics for longer life*

2. FUNCIONAMENTO DOS TERMOPARES

Os efeitos termoelétricos expostos estão interligados. O funcionamento de um termopar envolve os três efeitos que se acabam de indicar: enquanto o efeito de Seebeck dá origem a uma f.e.m., a partir da qual se podem medir temperaturas; os efeitos de Peltier e de Thomson dão origem à produção ou à absorção de calor, podendo originar erros na medida dessa mesma temperatura e que será necessário minimizar.

A f.e.m. produzida por um termopar é contínua, é nula à temperatura de 0 K (zero absoluto) e não muda de polaridade com a variação da temperatura. Por convenção, quando se diz que um termopar é constituído pelos materiais A e B, o material A (citado em primeiro lugar) é o menos electronegativo e o material B é o mais electronegativo. Pode, assim, de uma forma simplista, dizer-se que a f.e.m. produzida por um termopar é sempre positiva (Figura 4). Esta relação $e_{(A,B)}(T)$ é, também, biunívoca.



Figura 4. f.e.m. produzida por um termopar em função da variação da temperatura absoluta (curva qualitativa).

Como ordem de grandeza pode indicar-se que a f.e.m. máxima produzida pelos termopares nunca ultrapassa os 20 mV a 80 mV, consoante o tipo e para a temperatura máxima de utilização.

Um dos primeiros problemas que se colocam ao utilizador de termopares é o de efectuar a medição da sua f.e.m., $e_{(A,B)}(T)$, que é igual à tensão u_o na Figura 1b). A primeira sugestão será a utilização de um voltímetro de Corrente Contínua (CC), como se indica na Figura 5.

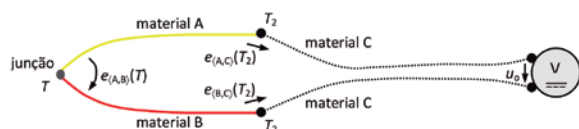


Figura 5. Medição, com um voltímetro de CC, da f.e.m. produzida por um termopar.

A configuração apresentada tem, no entanto, o inconveniente de introduzir um erro na medida, uma vez que, ao se ligarem os cabos do voltímetro aos dois metais constituintes do termopar, são introduzidas novas junções, cujo efeito não se cancela. Observe-se o seguinte:

- a junção de medida $e_{(A,B)}(T)$, à temperatura T , origina uma f.e.m. $e_{(A,B)}(T)$;
- as junções introduzidas pelos cabos do voltímetro (A,C) e (B,C) , supostas à mesma temperatura T_2 , originam as f.e.m. $e_{(A,C)}(T_2)$ e $e_{(B,C)}(T_2)$, respectivamente;
- a tensão lida pelo voltímetro é $u_o = -e_{(A,C)}(T_2) + e_{(A,B)}(T) + e_{(B,C)}(T_2)$;
- uma vez que $e_{(A,C)}(T_2) \neq e_{(B,C)}(T_2)$, existirá um erro na medida, podendo chegar a corresponder a alguns graus Celsius, consoante o tipo de materiais e o valor de T_2 .

Este problema foi solucionado pela introdução de uma **junção de referência**, conforme se representa na Figura 6, constituída

pelos mesmos materiais da junção de medida e a uma temperatura de referência bem definida, T_R , que se convencionou ser 0 °C. Este procedimento foi adoptado internacionalmente. Repare-se, agora, que a tensão lida pelo voltímetro é dada por

$$u_o = -e_{(B,C)}(T_2) - e_{(A,B)}(T_R) + e_{(A,B)}(T) + e_{(B,C)}(T_2) \Rightarrow u_o = e_{(A,B)}(T) - e_{(A,B)}(T_R) \quad (7)$$

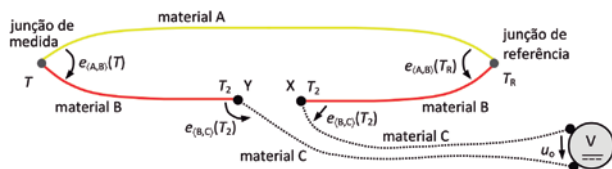


Figura 6. Medição, com um voltímetro de CC, da f.e.m. produzida por um termopar duplo: junção de medida e junção de referência.

Nos circuitos que empregam termopares para a medição de temperaturas, utilizam-se **sempre duas junções**. O resultado obtido não depende dos cabos usados no voltímetro.

Embora um termopar industrial possa ser construído com uma grande variedade de pares de metais, na prática, os tipos de termopares encontram-se **normalizados** pela ANSI⁴ e por outras organizações internacionais, sendo designados pelas letras B, E, J, K, R, S e T. Apesar de não serem referidos nesta norma existem, ainda, outros tipos de termopares normalizados, designados pelas letras C, D, G, M, N e P, ou sem designação específica que não seja o nome dos materiais que os constituem.

Para o conjunto de termopares normalizados pela ANSI, com a configuração da Figura 6, isto é com duas junções, estando a junção de referência a 0 °C, os valores da tensão u_o , entre os terminais X e Y, estão **tabelados** e são fornecidos actualmente pela ASTM⁵ e pelos fabricantes de termopares. Na Figura 7 encontram-se representados, sob a forma gráfica, os valores dessas tensões para os termopares do tipo B, E, J, K, R, S e T.

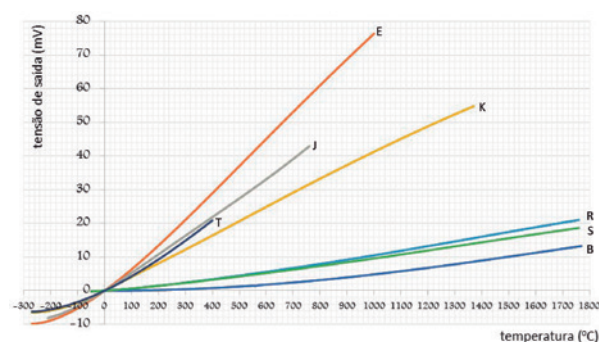


Figura 7. F.e.m. dos termopares normalizados pela ISA MC96.1:1982 "Temperature Measurement Thermocouples".

⁴ American National Standards Institute, Norma MC96.1, de Janeiro de 1975, revista pela International Society of Automation (ISA), Norma ISA MC96.1:1982, "Temperature Measurement Thermocouples".

⁵ American Society for Testing and Materials, Norma E230/E230M-17. A anterior Norma ISA MC96.1:1982, "Temperature Measurement Thermocouples" foi retirada em 2011.